

Аэрокосмический научный журнал

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://aerospjournal.ru>

Ссылка на статью:

// Аэрокосмический научный журнал.
МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015.
№ 06. С. 1–12.

DOI: **10.7463/aersp.0615.0827703**

Представлена в редакцию: 16.10.2015

Исправлена: 30.10.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 681.3.06(075.8)

Проектирование и имитационное моделирование объектов вооружения

Строгалева В. П.¹, Толкачева И. О.¹,
Товарнов М. С.^{1,*}

* mtovamov@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы реализации системного подхода к проектированию сложных технических систем, каковыми являются объекты вооружения, в виде иерархически-упорядоченной структуры. Дается обоснование роли и места имитационного моделирования в информационной технологии принятия проектных решений. Проводится анализ особенностей построения имитационных моделей и областей их применения. Приведен тестовый пример построения классической имитационной модели для определения вероятности выпадения орла при подбрасывании монеты. В заключение рассмотрены вопросы оценки адекватности имитационного моделирования процессам функционирования реальных технических объектов, включая объекты вооружения, и дается алгоритм оценки вероятности поражения бронированной цели управляемой ракетой тактического назначения. Отмечается, что имитационная модель может в известной степени заменить дорогостоящий этап натурных испытаний.

Ключевые слова: системный подход, проектное решение, имитационное моделирование, иерархический подход, информационная технология, принятие решений

Введение

Одной из основных, если не главной, целью человека в его многогранной практической деятельности является производство материальных ценностей, предназначенных для удовлетворения новых потребностей, даже если эти ценности направлены на уничтожение людей. Задачи производственной деятельности, служащие для достижения поставленной цели, включают этапы изобретательства, инженерного анализа, оценки эффективности, принятия решений и другие виды деятельности, а весь этот цикл взаимосвязанных и взаимообусловленных работ и составляет предмет проектирования.

В свою очередь, имитационное моделирование – один из самых мощных инструментов анализа, которыми располагают люди, ответственные за разработку и функционирование сложных процессов и систем. Идея имитационного моделирования дает возмож-

ность пользователю экспериментировать с системами (существующими или предлагаемыми) в тех случаях, когда это делать на реальных объектах практически невозможно или нецелесообразно.

Основной задачей предлагаемой работы является обоснование роли и места имитационного моделирования в информационной технологии проведения проектных работ с целью достижения максимальной эффективности получаемых проектных решений.

Выделение проектирования в сфере инженерной деятельности и его обособление в самостоятельную область деятельности во второй половине XX века привело к кризису традиционного инженерного мышления, ориентированного на приложение знаний лишь естественных и технических наук и созданию относительно простых технических систем. Результатом этого кризиса было формирование системотехнической деятельности, направленной на создание сложных технических систем [1].

1. Особенности проектирования сложных технических систем

Здесь хотелось бы отметить, что в соответствующей литературе, посвященной вопросам решения проектных задач, используются многочисленные определения различных подходов к проектированию. Не останавливаясь на их перечислении, отметим лишь два основных определения – классический и системный подходы [2].

Разработка модели на базе классического подхода предполагает суммирование отдельных компонент, описывающих поведение соответствующих подсистем, в единую модель, причем каждая из компонент решает свои собственные задачи и изолирована от других частей модели. В связи с этим утверждается, что классический подход может быть использован для реализации сравнительно простых моделей, в которых возможно разделение и взаимно независимое рассмотрение отдельных сторон функционирования реального объекта. Отмечаются также две отличительные стороны классического подхода: движение от частного к общему, и то, что создаваемая модель (система) образуется путем суммирования отдельных ее компонент при отсутствии учета возникновения нового системного эффекта.

На практике классический подход встречается крайне редко, поскольку квалифицированные разработчики СТС использовали принципы системного подхода, пользуясь своим опытом, интуицией и инженерным талантом [3]. Однако интуитивный подход без применения правил системного анализа может оказаться недостаточным для решения все более усложняющихся задач инженерной деятельности.

Дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы и процесс их проектирования, называют системотехникой. Основные идеи и принципы проектирования сложных систем, выраженные в системном подходе, для специалиста в области системотехники являются очевидными и естественными. Однако их соблюдение и реализация были зачастую сопряжены с определенными трудностями, обусловливаемыми особенностями конкретных объектов проектирования, отсутствием быстродействующей вычислительной техники, психологической инерцией, недостатком исходной информации,

традициями, боязнью принятия неудачных решений и пр. Это обусловило тот факт, что в России системный подход приживался весьма болезненно, и его использование при разработке СТС имело место лишь при получении технических решений, внедрение которых не влекло к серьезным негативным последствиям.

Последние десятилетия ознаменовались не только появлением понятия «системотехника», но и таких понятий, как «информационные технологии» и «имитационное моделирование». Создание в 1978 году первого персонального компьютера явилось причиной быстрого их распространения и развития в качестве инструментального средства усовершенствования процесса проектирования.

Информационная технология как наука о производстве, обработке и передачи (обмена) информации возникла именно потому, что информация стала рассматриваться как вполне реальный производственный ресурс наряду с другими материальными ресурсами (масса, энергия, импульс и т.д.). Использование понятия информационная технология в процессе проектирования СТС потребовало соответствующей методологии ведения проектных работ.

Под методологией обычно понимают совокупность приемов, а также математический аппарат научных исследований, которые имеют определенную общность и сохраняют свое практическое значение в продолжение всего процесса ведения проектных работ. В основе методологии проектирования современных СТС (в частности образцов вооружения, на примере которых будут иллюстрированы основные ключевые понятия) лежат принципы системного подхода.

Рассмотрение объекта (подсистемы) в многообразии его связей с другими объектами и построение его в целях повышения эффективности большой системы можно назвать системным подходом [4].

При реализации системного подхода в процессе проектирования можно выделить два основных направления: подход, рассматривающий систему глобально, формирующий ее и все составляющие ее подсистемы за единый акт оптимизации, и подход, расчленяющий систему на элементы, и идущей при ее формировании от элементов. Если первый олицетворяет торжество общей идеи, единого, ясного замысла, то второй опирается на внутренние закономерности развития самих элементов и заложенный в них предметный опыт людей.

Первый подход полезен на стадии первоначального исследования вопроса, при грубом описании и формировании систем, но основным рабочим параметром является второй – формирование системы и оценка эффективности решений по частям, по уровням иерархии, по объектам.

При анализе СТС, описываемых достаточно большим числом параметров, нельзя не учитывать ограниченных возможностей исследователя по переработке и оценке информации о системе. Нельзя полагать, что все вопросы могут быть решены одним исследователем (человеком или коллективом). Именно информационная ограниченность и специализация людей, которые проектируют, изготавливают и эксплуатируют системы, обусловила

их членимый, как правило, иерархический характер, позволяющий описывать эти системы в виде иерархической структуры.

Когда мы употребляем термин «иерархическая структура», имеется в виду только то, что наша система разбита на отдельные подсистемы, обладающие самостоятельными правами и выполняющие самостоятельные специфические функции [4,5].

Рассмотрим иерархию задач проектирования на примере проектирования системы вооружения (рис. 1).

Пользуясь принципом иерархической подчиненности задачу проектирования системы вооружения можно разбить на ряд уровней с соответствующими методиками получения решений на каждом из них.

Такая иерархия представляется, в общем случае, бесконечной, что увеличивает степень детализации разрабатываемого объекта вооружения.

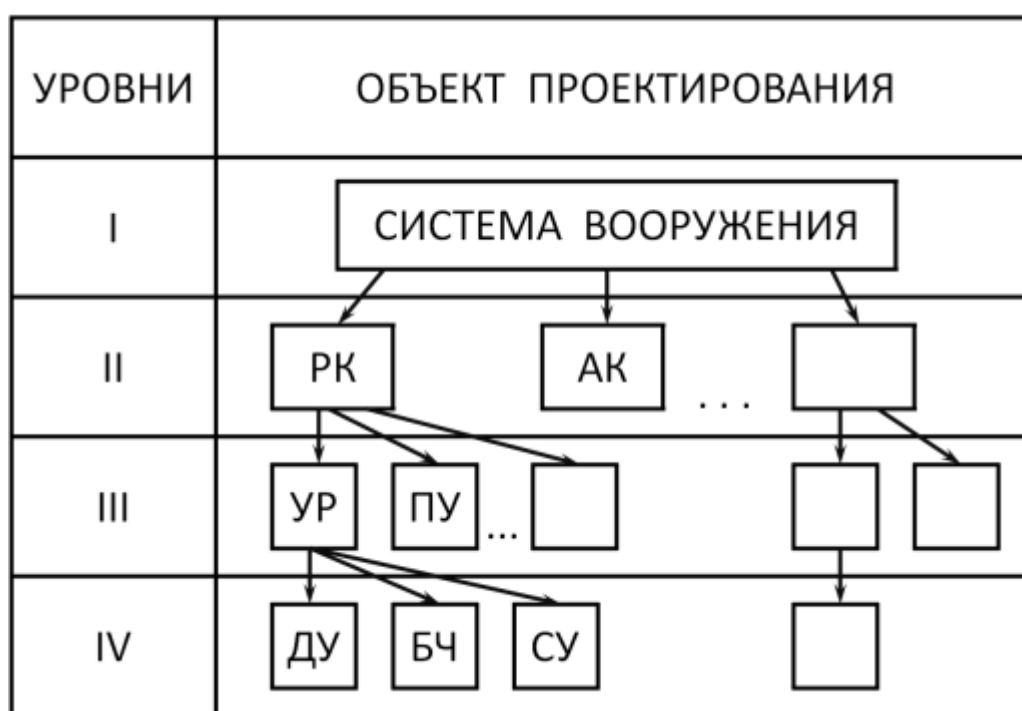


Рис.1. Иерархическая структура задач проектирования объекта вооружения: РК – ракетный комплекс; АК – артиллерийский комплекс; УР – управляемая ракета; ПУ – пусковая установка; ДУ – двигательная установка; БЧ – боевая часть; СУ – система управления.

Не останавливаясь подробно на интерпретации приведенной на Рис.1 блок-схемы, отметим главное: решение задачи проектирования на уровне « n » состоит в синтезе подсистем уровня « $n-1$ » и в разработке требований технического задания (ТЗ) на уровень « $n+1$ ». После получения требований ТЗ исследователь уровня « $n+1$ » может обособиться и вести проектные работы самостоятельно.

Иерархия задач проектирования, представленная на рис.1, порождает иерархию процедур реализации самого процесса проектирования (Рис.2).



Рис.2. Процедура проектирования СТС для подсистемы n -го уровня

В практике инженерного проектирования все задачи делятся на две группы: *анализ* и *синтез*. Это процессы мысленного или практического разложения целого на составные части и воссоединения целого из частей. Этапы анализа и синтеза диалектически взаимосвязаны.

Подобно тому, как части подчиняются целому, служат ему, анализ, в конечном итоге, служит синтезу, совершается во имя синтеза, направляется и контролируется синтезом.

При решении проектных задач различают синтез принципа действия, структурный, параметрический, а также структурно-параметрический синтез [4].

В частности, при проектировании УР синтез принципа действия предполагает конкретные реализации подсистем (ДУ - ракетный двигатель твердого топлива; СУ – самонаведение и т.д.). Результат синтеза принципа действия обычно называют технической концепцией.

Структурный синтез предполагает выбор компоновочной схемы, а параметрический синтез – выбор значений проектных параметров, реализующих экстремальное значение некоторого критерия качества.

Результаты синтеза принципа действия и структурно-параметрического синтеза в общем случае необходимо подтвердить на адекватной математической модели в стохастической постановке, имеющей минимальную погрешность – так называемой имитационной модели [5]. Отметим, что наличие имитационной модели на каждом уровне иерархии не является обязательным, и она может быть использована по окончании всех проектных расчетов.

Существуют многочисленные споры относительно самого термина «имитационное моделирование», поскольку сочетание слов имитация и моделирование недопустимо и является тавтологией. Однако, рассматривая исторический процесс формирования этого термина, надо прийти к выводу, что это словосочетание определяет в моделировании та-

кую область, которая относится к получению экспериментальной информации о сложном объекте, путем моделирования на ЭВМ.

До настоящего момента особое внимание в толковании термина «имитационное моделирование системы» было уделено первому слову. Однако не следует упускать из вида, что создание любой (в том числе и имитационной) модели предполагает, что она будет отражать лишь наиболее существенные с точки зрения конкретной решаемой задачи свойства объекта-оригинала. Английский аналог этого термина — *systems simulation* — при дословном переводе непосредственно указывает на необходимость воспроизводства (симуляции) лишь основных черт реального явления (ср. с термином «симуляция симптомов болезни» из медицинской практики). Важно отметить еще один аспект: создание любой (в том числе и имитационной модели) есть процесс творческий (не случайно Р. Шеннон [5] назвал свою книгу «Имитационное моделирование систем — искусство и наука»), и, вообще говоря, каждый автор имеет право на собственную версию определения модели реальной системы.

Подводя итог, скажем, что под имитационной моделью мы будем понимать модель, отвечающую следующим основным требованиям, которые предъявил к ней основоположник термина Р. Шеннон [5]:

- наличие стохастичности, определяемой исходной экспериментальной информацией и подвергающейся статистической обработке;
- наличие быстродействующего компьютера, позволяющего обеспечить большое количество реализаций имитационной модели.

Таким образом, имитационная модель – это численный эксперимент, подверженный ошибкам измерения, и реализуемый на быстродействующей ЭВМ.

При создании имитационной модели любой исследуемой системы необходимо, как правило, реализовать три основных этапа

- сбор и обработка статистического материала для описания поведения системы;
- выдвижение и подтверждение статистических гипотез, которые могут объяснить наблюдаемое поведение;
- использование этих гипотез для предсказания будущего поведения системы.

2. Имитационная модель подбрасывания монеты

Чтобы глубже проникнуть в суть разработки имитационной модели рассмотрим простейший пример определения вероятности выпадения «орла» при подбрасывании монеты. На основе использования определения искомой вероятности как отношения числа благоприятных исходов к общему числу исходов, получим, что вероятность выпадения «орла» $P_0=1/2$. Такой подход в соответствии с классификацией различных способов исследования систем можно назвать аналитическим решением поставленной задачи [6,7].

Построение имитационной модели начинается с подготовки исходных данных, которая заключается в подбрасывании монеты большое число раз и фиксировании числа удачных попыток выпадения «орла» (эксперимент с реальной системой). Отношение числа

удачных попыток к общему числу подбрасываний при неограниченном числе подбрасываний позволяет найти закон распределения случайной величины выпадение «орла».

Чтобы не бросать монету самим, воспользуемся результатами французского естествоиспытателя XVIII-го века Ж. Бюффона, который при 4040 бросаниях монеты ($n = 4040$) получил 2048 выпадений «орла» ($n_1 = 2048$) и 1992 выпадений «решки» ($n_2 = 1992$). Совместимо ли это с гипотезой о том, что вероятность выпадения «орла» при одном бросании равна $\frac{1}{2}$?

Из математической статистики известно [8], что наиболее распространенным критерием подтверждения непараметрических гипотез (гипотеза H_0 : выпадение «орла» и «решки» равновероятны) является критерий Пирсона χ^2 («хи - квадрат»).

Используя на компьютере датчик случайных чисел, распределенных по равномерному закону, имитируя, таким образом, подбрасывание монеты, мы получим при достаточно большом числе попыток величину искомой вероятности, близкую к 0,5. Если случайное число меньше 0,5 – выпадает «орел», больше 0,5 – «решка». Вероятность выпадения «орла» рассчитывается как отношения числа выпавших «орлов» к общему числу испытаний n .

Такой подход к решению технических задач называется имитационным моделированием, и, несмотря на кажущуюся его простоту, он зачастую является незаменимым при рассмотрении трудноразрешимых, а то и неразрешимых проблем, возникающих при исследовании космоса, в военной технике, экономике и пр.

Как уже отмечалось, имитационная модель может использоваться для подтверждения результатов, полученных после проведения этапа структурно-параметрического синтеза для каждой подсистемы любого уровня иерархии, но наиболее целесообразным представляется использовать этот метод на выходе системы в целом. Такой подход позволит не только оценить степень соответствия полученных результатов заданным ТТХ, но и заменить в известной степени дорогостоящие натурные испытания с расчетом показателей эффективности разрабатываемого образца вооружения.

3. Имитационная модель управляемой ракеты тактического назначения

В работе [9] приводится имитационная модель управляемой ракеты (УР) тактического назначения, позволяющая оценить характеристики рассеивания и рассчитать вероятность поражения цели. Модель учитывает влияние ряда случайных факторов, таких как разброс тяговременных, аэродинамических и массогабаритных характеристик, шумы системы управления и др. на процесс функционирования ракеты при полете ее в область цели.

Построение имитационной модели базируется на пространственной системе уравнений движения с учетом работы системы управления. Учет случайных факторов проводится путем реализации процедур розыгрыша по методу Монте-Карло, при известном законе их распределения.

Исходными данными для модели являются номинальные значения и среднеквадратические отклонения тяговременных, аэродинамических и массогабаритных характеристик УР, ошибки системы управления, а также условия пуска.

УР запускается из пускового контейнера на высоту 30 – 50 м и выводится в область цели, расположенной на дальности до 10 км, при помощи инерциальной системы наведения. В определенный момент при подлете к цели происходит включение тепловой головки самонаведения (ГСН) и переход на самонаведение. Поражение бронетанковой техники осуществляется сверху при помощи кумулятивной боевой части (БЧ). При известном законе поражения и известных характеристиках БЧ может быть рассчитана вероятность поражения цели.

Исходные данные для имитационной модели УР можно разделить на четыре группы:

1. Характеристики УР:

- массогабаритные – калибр, площадь крыльев, длина ракеты, значения массы, координаты центра масс, моментов инерции относительно главных центральных осей;
- аэродинамические – коэффициенты подъемной силы, лобового сопротивления, стабилизирующего и демпфирующего моментов, координата центра давления как функции числа Маха;
- тяговременные – тяга, режимы работы двигательной установки;
- характеристики системы управления – тип и метод наведения, управляющий момент, располагаемая перегрузка, частота вращения относительно продольной оси.

2. Параметры пуска, которые являются начальными условиями для решения системы дифференциальных уравнений: начальная скорость ЛА; начальные углы тангажа, рыскания и крена; начальные углы атаки и скольжения; начальные скорости вращения относительно главных центральных осей; начальные координаты центра масс.

3. Характеристики цели: скорость цели; координаты точки прицеливания; габаритные характеристики.

4. Параметры внешней среды: плотность воздуха, скорость звука, скорость ветра.

Поражаемая цель представляла собой прямоугольник с нанесенной на него сеткой, каждой клетке которой соответствует значение вероятности поражения цели при попадании УР в эту клетку.

Результатами расчета являются трубки траекторий УР и координаты точек попадания. На рис. 3 представлены трубки рассчитанных траекторий в плоскости тангажа, а на рис. 4 – точки попадания в контур танка в плане (расчет проводился для 25 реализаций при дальности до цели 10000 м).

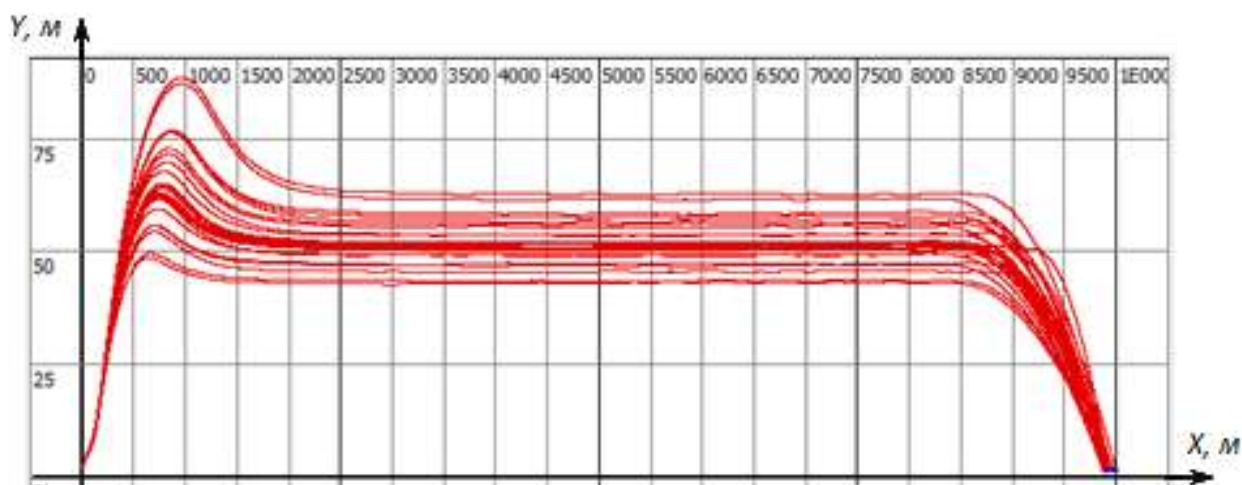


Рис.3. Трубка траекторий полета УР в плоскости тангажа

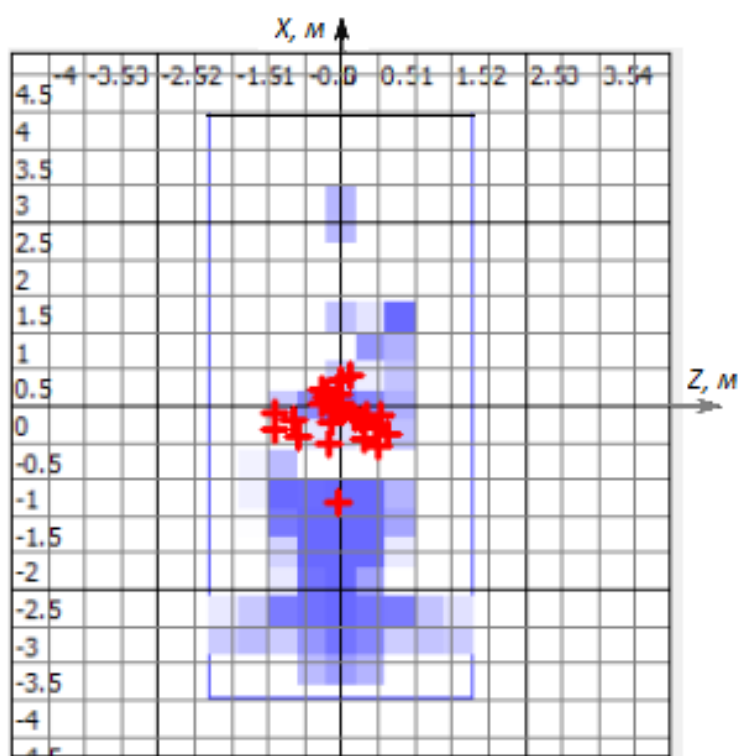


Рис.4. Координаты точек попадания УР в танк

Значение вероятности поражения цели рассчитывается суммированием вероятностей поражения по всем клеткам и соответствующим делением на число реализаций.

Заключение

Таким образом, материалы, приведенные в настоящей статье, представляют на взгляд авторов, понятную, логически обоснованную схему проектирования СТС, и в частности, образцов вооружения. Основу предлагаемой схемы составляют современные воз-

зрения системного подхода на формирование информационной технологии ведения проектных работ с использованием математического аппарата ИМ для подтверждения адекватности результатов моделирования реальной системе и оценки эффективности действия.

Список литературы

1. Степин В.С., Горохов В.Г., Розов М.А. Философия науки и техники: Учебное пособие. М.: Гардарики, 1999. 400 с.
2. Кийкова Е.В., Лаврушина Е.Г. Имитационное моделирование экономических процессов. Учебное пособие. Владивосток: ВГУЭС, 2007. 128 с.
3. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1968. 536 с.
4. Строгалева В.П., Новиков Б.К., Толкачева И.О. Системный подход к проектированию и оценка эффективности ракетного и ствольного оружия. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 178 с.
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: пер. с англ. М.: Мир, 1978. 420 с.
6. Строгалева В.П., Толкачева И.О. Системный подход к проектированию сложных технических систем // Оборонная техника. 2013. №9-10. С.28-32.
7. Строгалева В.П., Толкачева И.О. Решение прикладных технических задач методом имитационного моделирования // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. вып. 3. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-3-627](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-627)
8. Математическая статистика: Учеб. для вузов / В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др. / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 2-е изд. стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 424 с.
9. Строгалева В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 296 с.

Design and Simulation of Weapon Objects

V.P. Strogalev¹, I.O. Tolkacheva¹,

M.S. Tovarnov^{1,*}

[*mtovarnov@mail.ru](mailto:mtovarnov@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: system approach, project design, simulation, hierarchical approach, information technology, decision-making

The article dwells on the problems of implementing a systematic approach to design the complex technical systems, such as the objects of weapons, as a hierarchically ordered structure. It considers the possibility of using the simulation techniques for designing weapon objects to improve efficiency of methods used to determine design parameters of developed system.

The article justifies the role and place of simulation in information technology of making design decisions. It analyses the construction features of simulation models and areas of their applications. This approach allows us to determine design parameters of developed complex technical systems in the most reasonable and time-effective way and reduce the cost of expensive field tests.

The article defines key terms used in development of complex technical systems, such as a systematic approach, design, decision-making, information technology, hierarchical approach, methodology, methods, techniques, etc.

An example of the classical test simulation model construction is shown to determine the probability of an eagle coin toss, which describes in detail all phases of developing a simulation model such as information gathering, information processing and promotion of statistical hypotheses, and, at last, further behavior prediction of the complex technical system.

The article reviews the issues to estimate a simulation adequacy in terms of functioning real technical objects, including objects of weapons. It gives an algorithm for estimating a probability of the armored target defeat by a tactical guided missile. It is noted that using the appropriate methods to search design parameters of complex technical systems developed on the basis of simulation allows a significant improvement of their efficiency and reducing cost of expensive field tests, which is especially important when creating the new perspective weapons.

References

1. Stepin V.S., Gorokhov V.G., Rozov M.A. *Filosofiya nauki i tekhniki* [Philosophy of science and technology]. Moscow, Gardariki Publ., 1999. 400 p. (in Russian).

2. Kiikova E.V., Lavrushina E.G. *Imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov* [Simulation modeling of economic processes]. Vladivostok, VGUES Publ., 2007. 128 p. (in Russian).
3. Orlov B.V., Mazing G.Yu. *Termodinamicheskie i ballisticheskie osnovy proektirovaniya raketnykh dvigatelei na tverdom toplive* [Thermodynamic and ballistic basics of designing rocket engines solid fuel]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 536 p. (in Russian).
4. Strogalev V.P., Novikov B.K., Tolkacheva I.O. *Sistemnyi podkhod k proektirovaniyu i otsenka effektivnosti raketnogo i stvol'nogo oruzhiya* [A systematic approach to the design and evaluation of the effectiveness of the missile and cannon weapons]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 178 p. (in Russian).
5. Shannon Robert E. *Systems Simulation. The Art and Science*. USA, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1975. (Russ. ed. Shennon R. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka*. Moscow, Mir Publ., 1978. 420 p.
6. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. A systematic approach to design of complex technical systems. *Oboronnaya tekhnika = Defence equipment*, 2013, no.9-10. pp. 28-32 (in Russian).
7. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. Decision of the applied problem of engineering by method of simulation modeling. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 3. (in Russian). DOI: [10.18698/2308-6033-2013-3-627](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-627)
8. Goryainov V.B., Pavlov I.V., Tsvetkova G.M. et al. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 424 p. (in Russian).
9. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 296 p. (in Russian).